

宇宙のダークエネルギーと バリオン音響振動

H19年度 定例 第4回 物理学セミナー

吉川 耕司 (数理物質科学研究科 物理学専攻)

宇宙のダークなんとか

ダークマター

バリオンではない

質量をもち、ほとんど重力相互作用しかしない

バリオン

いわゆる、“普通の物質”

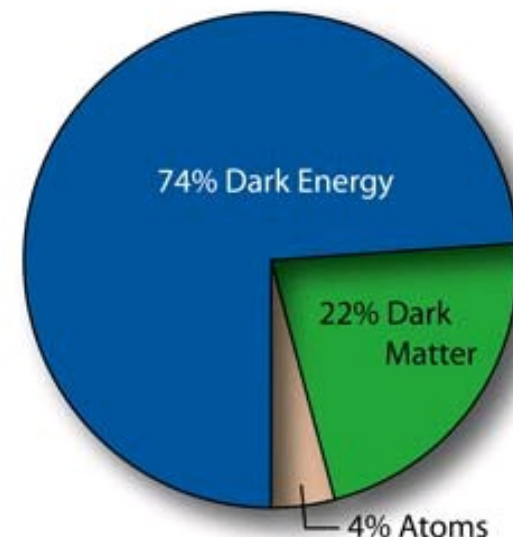
現在の宇宙で観測的に同定されているのは1/4程度

残りはダークバリオン

ダークエネルギー

全体の74%

その正体や起源は不明



by NASA/WMAP Science Team

宇宙の膨張とエネルギー組成

ロバートソン・ウォーカー計量

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

$a(t)$: 宇宙膨張の時間依存性 (scale factor)

フリードマン方程式

$$H^2 = \left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \sum_i \rho_i - \frac{Kc^2}{a^2} \quad (0,0)\text{-成分}$$

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} = - \frac{4\pi G}{3c^2} \sum_i (\rho_i + 3p_i) \quad (i,i)\text{-成分}$$

ρ_i, p_i : 各成分のエネルギー密度と圧力

エネルギー・運動量テンソルと 状態方程式

$$T^{\mu\nu} = (\rho + p)u^{\mu}u^{\nu} + pg^{\mu\nu}$$

$$T^{\mu\nu}_{;\mu} = 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{\rho} = -3\frac{\dot{a}}{a}(\rho + p)$$

$$p = w\rho \quad \text{の場合は} \quad \rho \propto a(t)^{-3(1+w)}$$

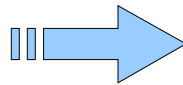
ダークマターとバリオン

$$p_m \ll \rho_m$$

輻射 (光子)

$$p_r = \frac{1}{3}\rho_r$$

$$\rho_m \propto a(t)^{-3}$$



$$\rho_r \propto a(t)^{-4}$$

宇宙膨張の加速度

ダークマターやバリオンなどの”まともな”物質を考える限り

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \sum_i (\rho_i + 3 p_i) < 0$$

S. Perlmutter (1997)

遠方Ia型超新星爆発の観測  $\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} > 0$

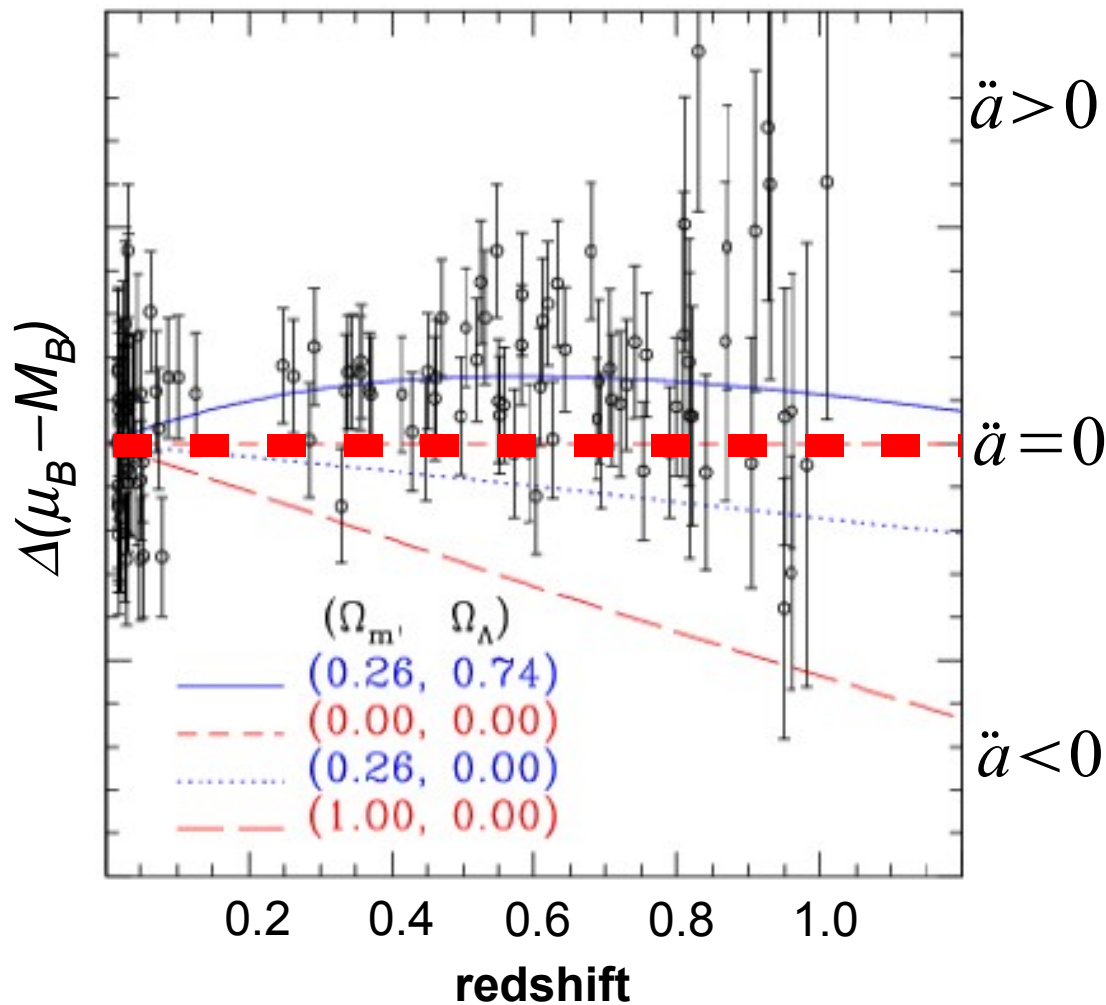
Ia型超新星：白色矮星と巨星の連星系での核爆発

観測的・経験的に絶対等級がほぼ一定



みかけの等級が距離の指標として使える

Ia型超新星のHubbleダイアグラム



Supernova Legacy Survey (SNLS)

Ia型超新星を系統的に探査するプロジェクト

71個の遠方にあるIa型超新星を発見

$$\frac{d^2 a}{dt^2} > 0 \quad \text{を支持}$$

$$\frac{d^2 a}{dt^2} < 0 \quad \text{である確立は1\%以下}$$

宇宙定数 Λ

Einstein方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



時空の幾何学の自由度

フリードマン方程式

$$H^2 = \left(\frac{1}{a} \frac{da}{dt} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \sum_i \rho_i - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{1}{a} \frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3c^2} \sum_i (\rho_i + 3p_i) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$\frac{d^2 a}{dt^2} > 0$ にすることができる **万有斥力** として働く

ダークエネルギー

宇宙定数を物質場の自由度 (真空のエネルギー) と考えると、

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} (T_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^V)$$

但し、

$$T_{\mu\nu}^V = -\frac{\Lambda c^4}{8\pi G} g_{\mu\nu} = (\rho^V + p^V) u_\mu u_\nu + p^V g_{\mu\nu}$$

$$\rho^V = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G} \quad w = \frac{p^V}{\rho^V} = -1$$

密度か圧力のどちらかが負になる成分とみなせる

より一般的に、

$$w = \frac{p^V}{\rho^V} \neq -1 \quad w = w(t)$$

のような成分も含めてダークエネルギーと呼ばれる

ダークエネルギーは宇宙定数か？

ダークエネルギーの正体はひとまず横に置いて、その性質を天文学的に調べたい。

ダークエネルギーのパラメータ： $w = \frac{p^V}{\rho^V} - \frac{1}{H} \frac{dw}{dt}$

ハッブルパラメータ

$$H(z)^2 = \frac{8\pi G}{3c^2} \sum_i \rho_i - \frac{Kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3} \exp\left(3 \int \frac{1+w(z)}{1+z} dz\right)$$

共動距離

$$\chi(z) = \int \frac{c}{H(z)} dz$$

宇宙膨張の履歴がわかれば、ダークエネルギーのパラメータがわかる

宇宙膨張を精密に測定する方法

ものの大きさを測るには、物差がいる

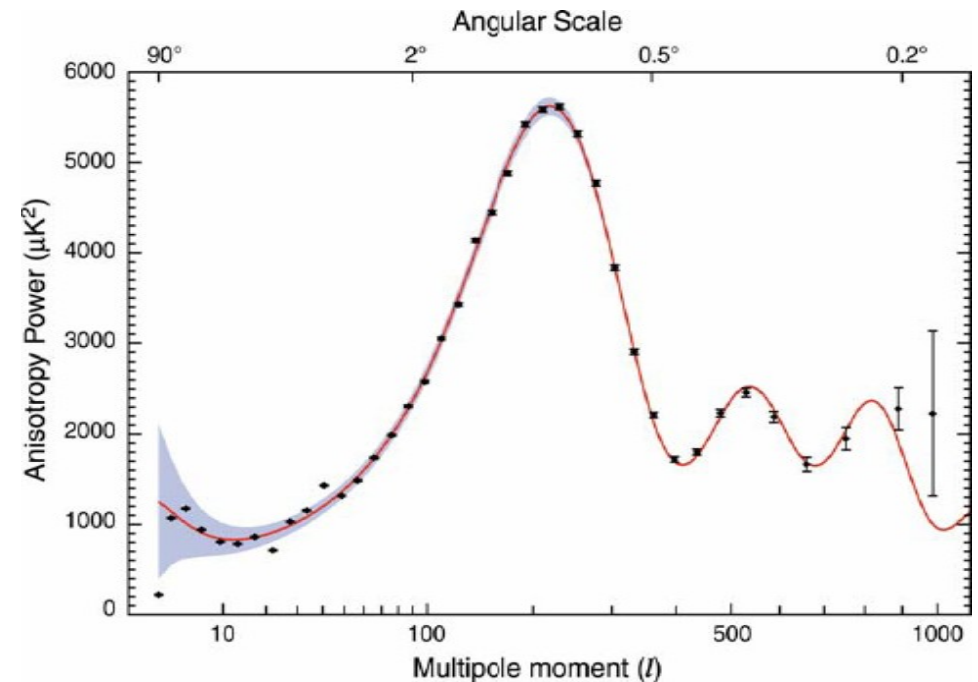
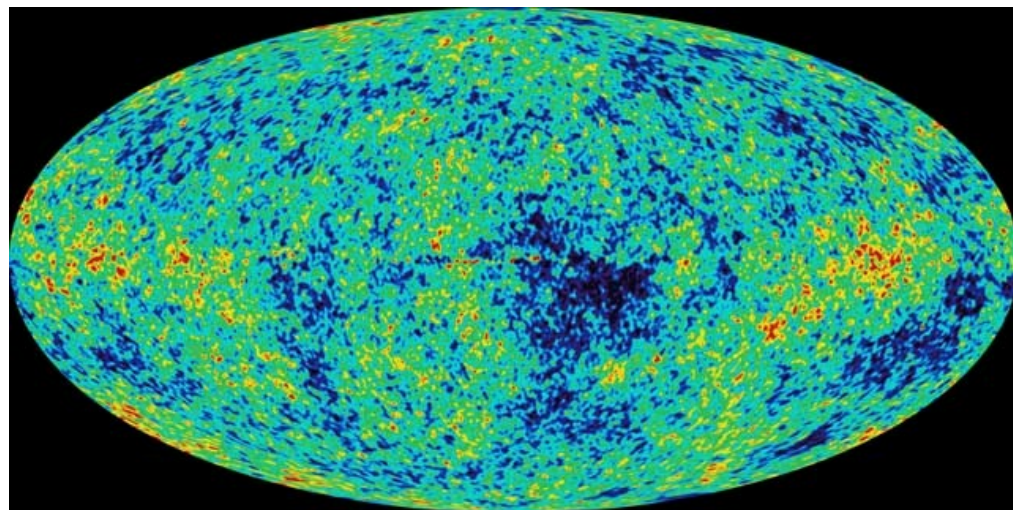
バリオン音響振動

宇宙の晴れ上がり以前：

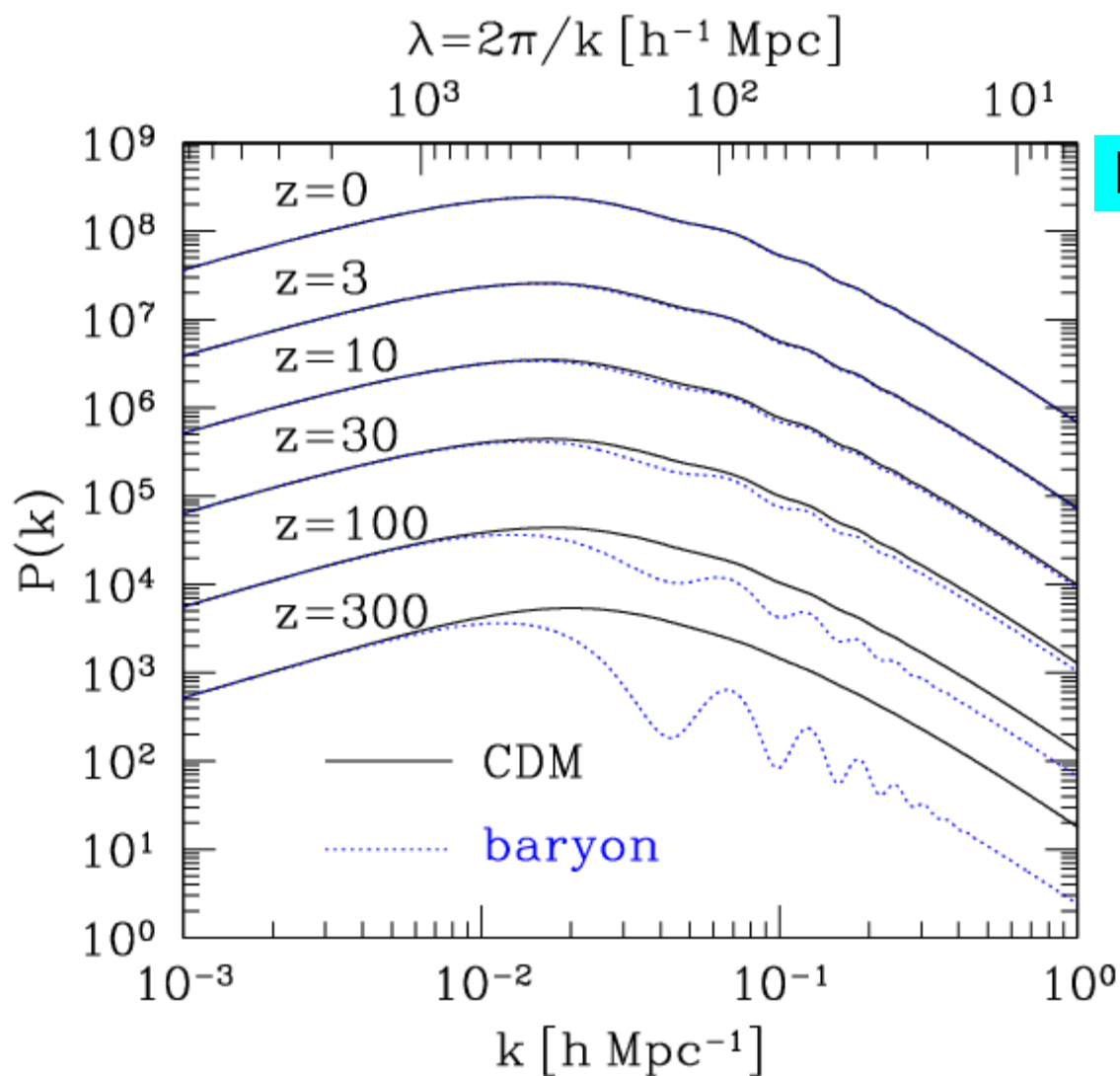
強い相互作用のために光子と電子とバリオンは混合流体を形成

バリオンの密度揺らぎ \longrightarrow 音波として音速で伝搬

ダークマターの密度揺らぎ \longrightarrow 重力不安定性により成長



バリオン音響振動



晴れ上がり後:

- バリオンと光子は分離
- 音波の振動パターンは晴上がり時に凍結
- バリオンはダークマターと重力相互作用



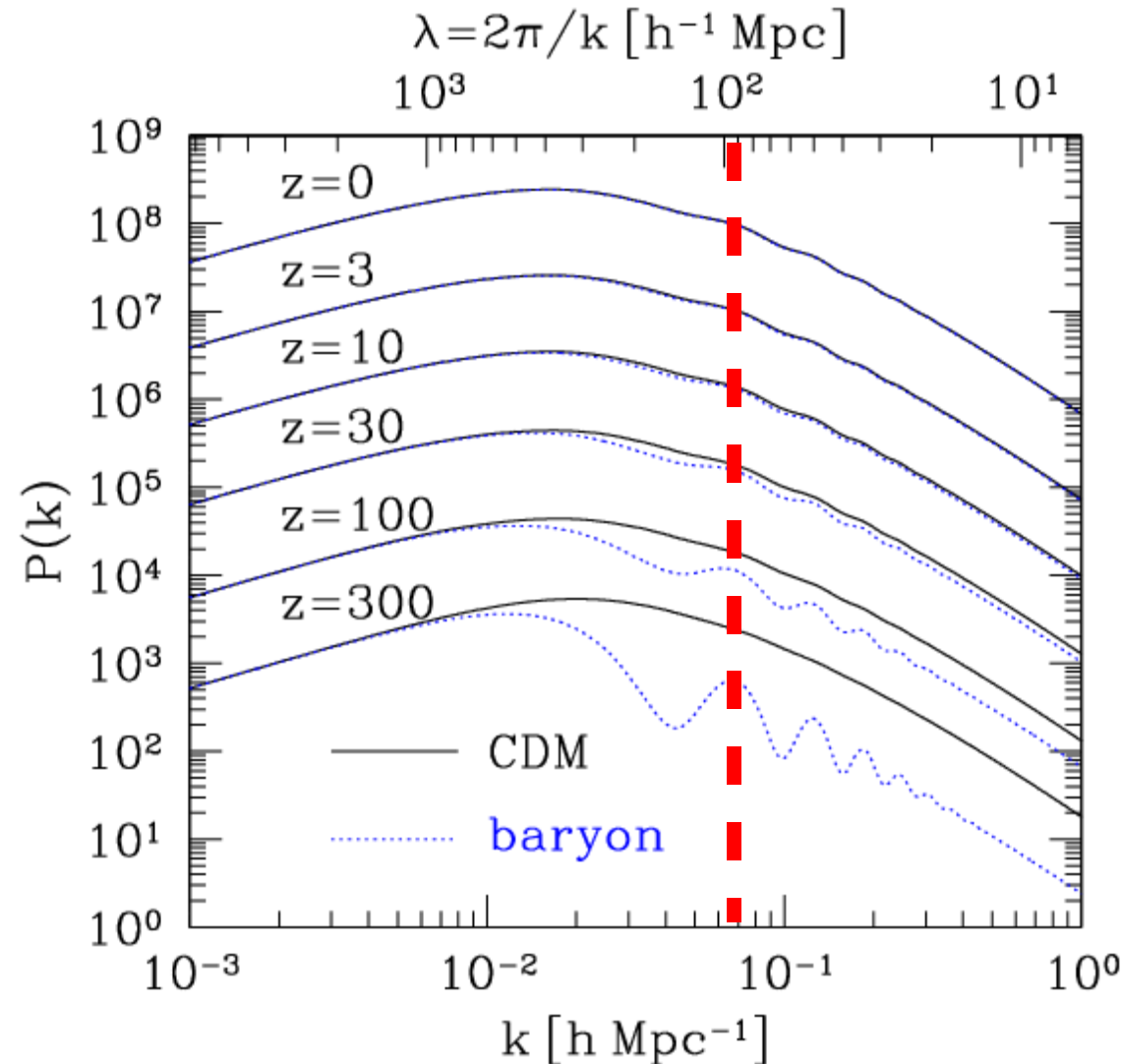
振動パターンがダークマターに伝搬



銀河等の天体の空間分布に反映

ものさしの目盛

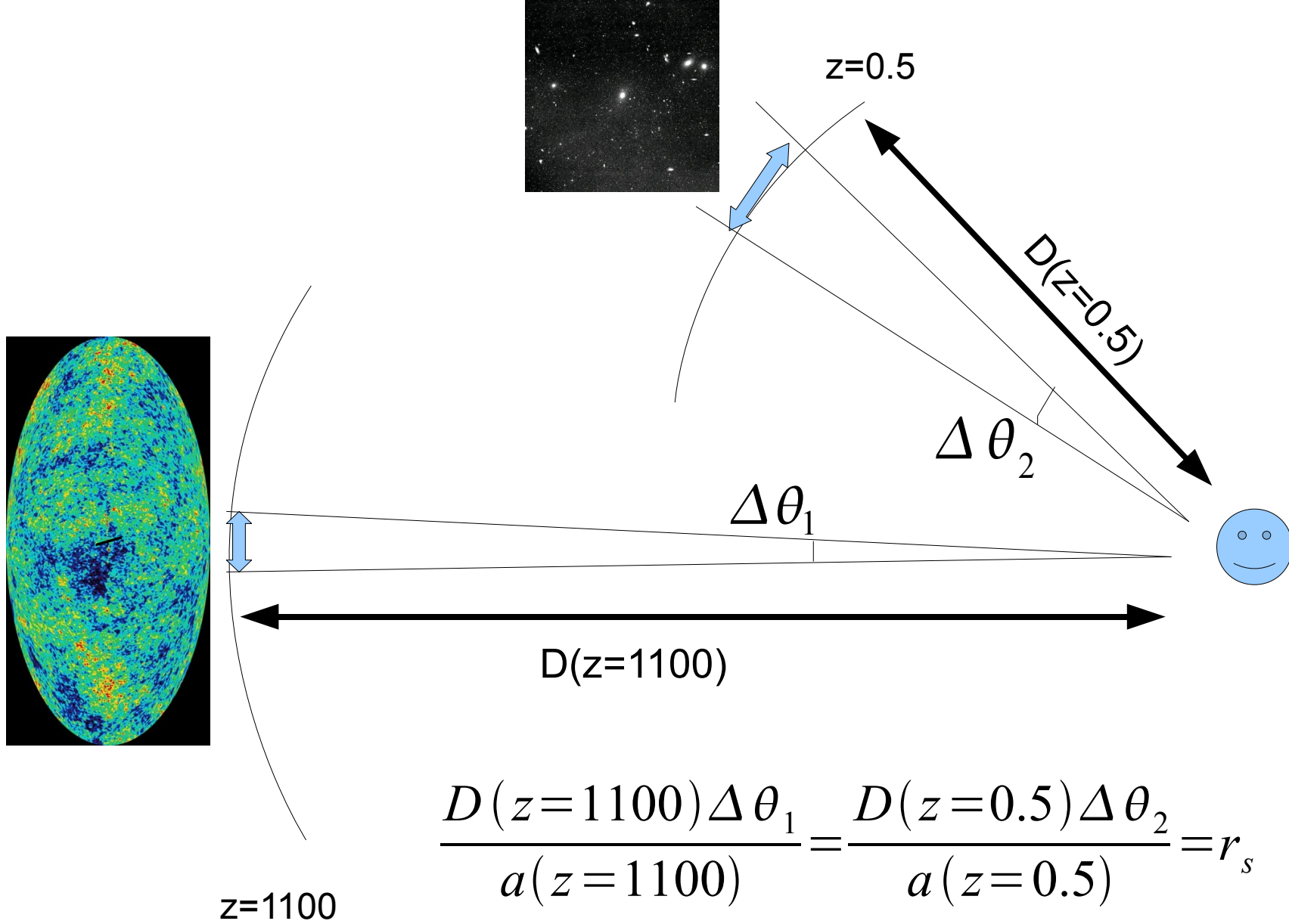
sound horizon



$$r_s = \int_0^{t_{dec}} c_s dt$$

$$= 108 h^{-1} \text{ Mpc}$$

銀河等の空間分布から、バリオン振動を検出すれば、その見かけの大きさから距離やハッブルパラメータがわかる。



$\Rightarrow \frac{\chi(z=1100)}{\chi(z=0.5)} = \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\theta_1}$

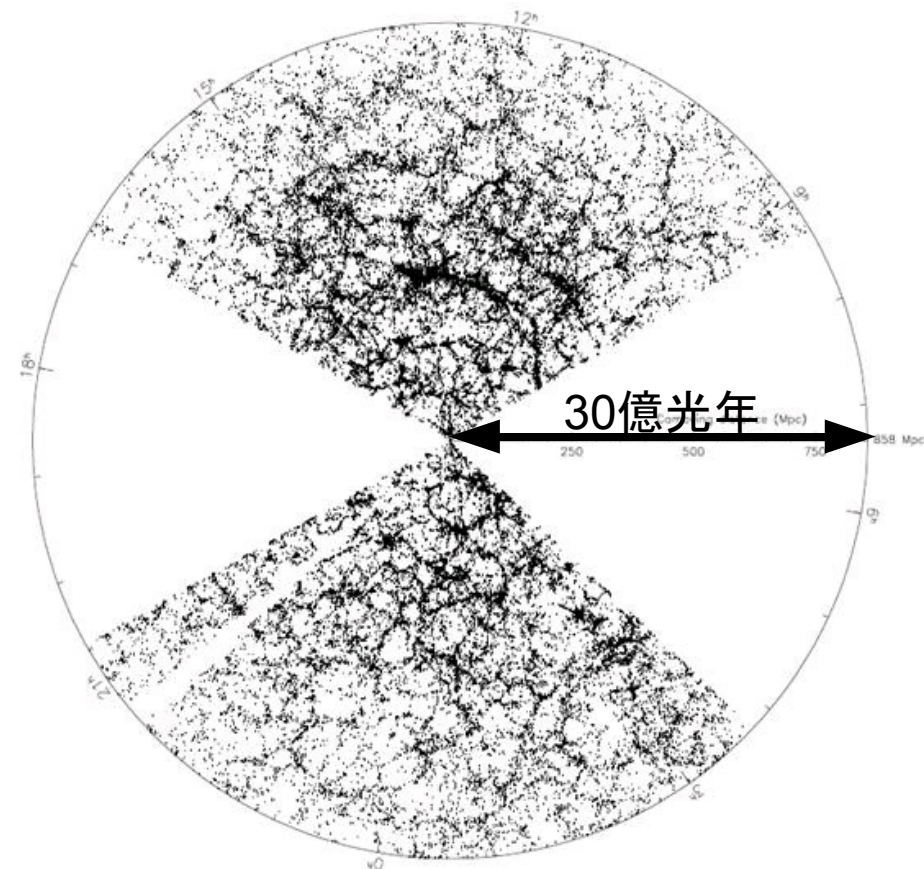
銀河の空間分布

銀河赤方偏移探査

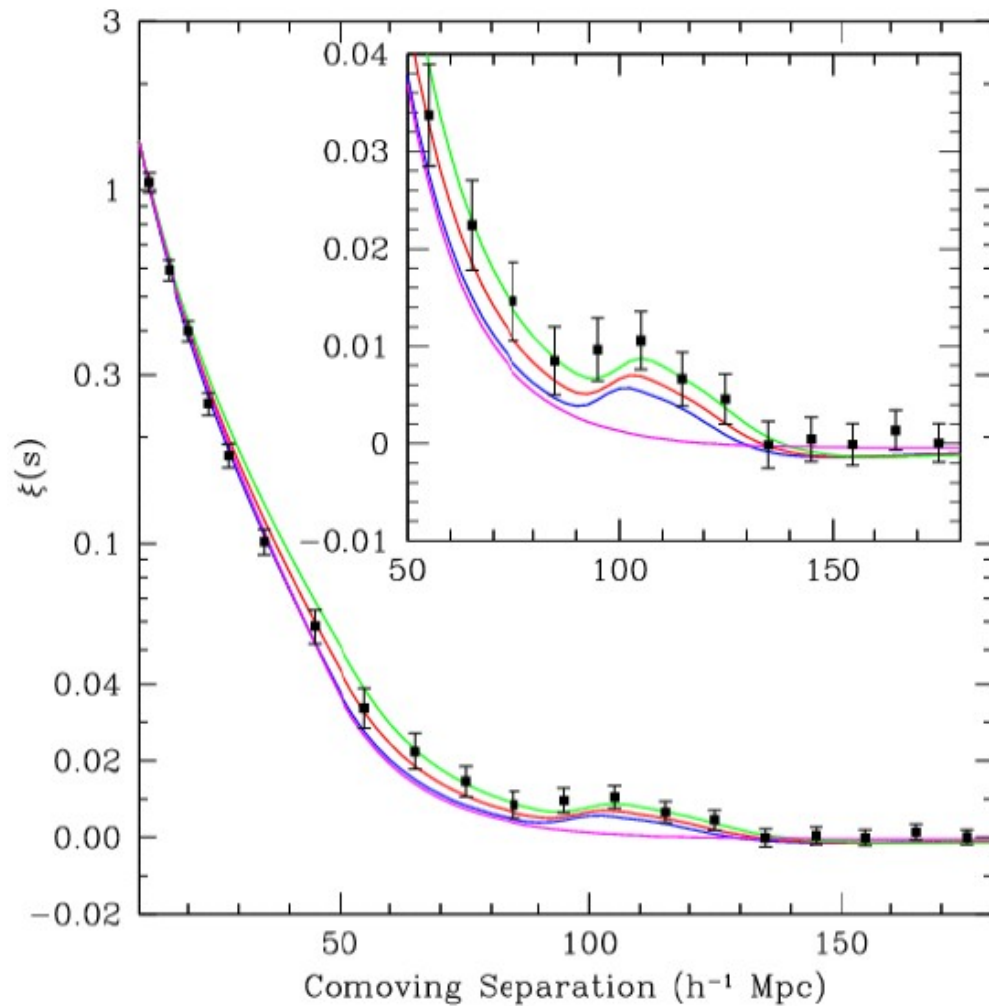
探査領域の銀河の向きと距離(赤方偏移)を全てしらべて銀河の地図をつくる

Sloan Digital Sky Survey (SDSS)

全天の25%の領域で赤方偏移 $z=0.5$ までの銀河の分布をしらべる



銀河分布でのバリオン振動の検出

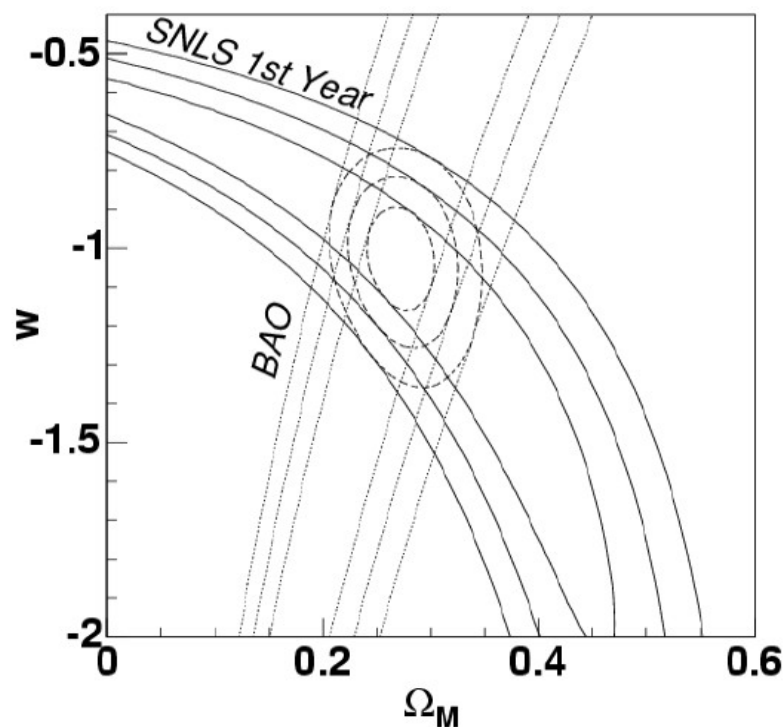
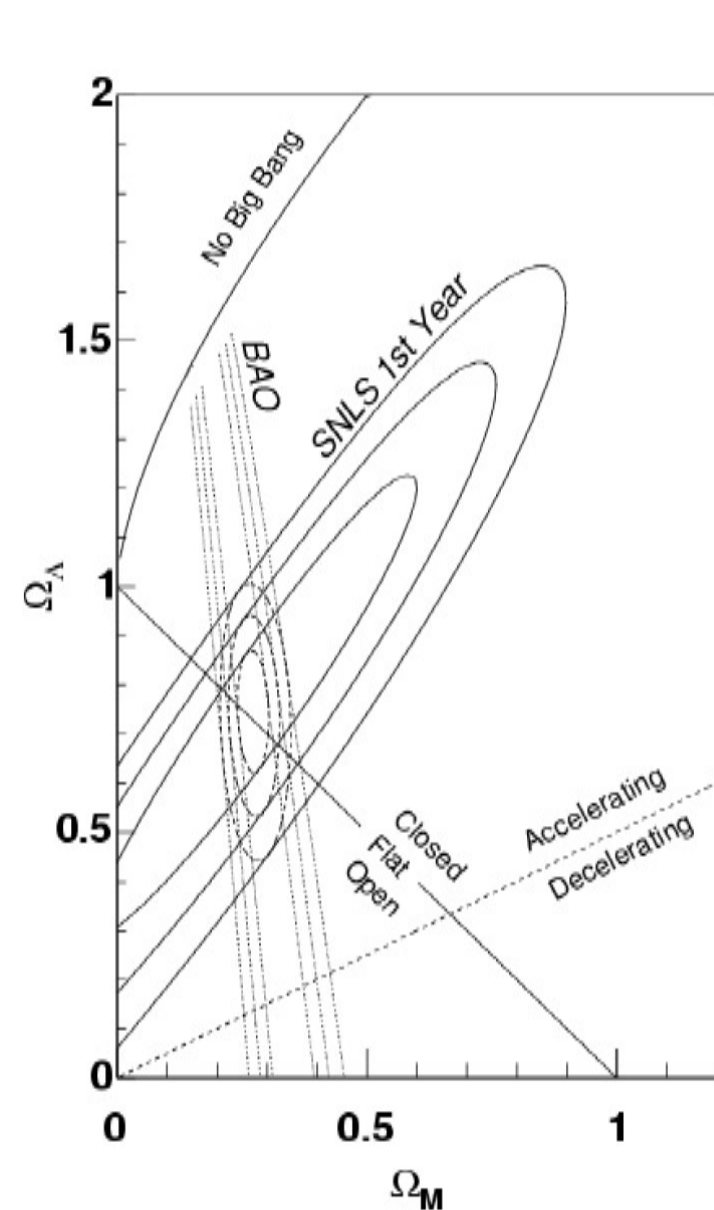


Eisenstein et al. (2005)

銀河分布で最初のバリオン振動の検出

$z=0.35$ での振動を検出

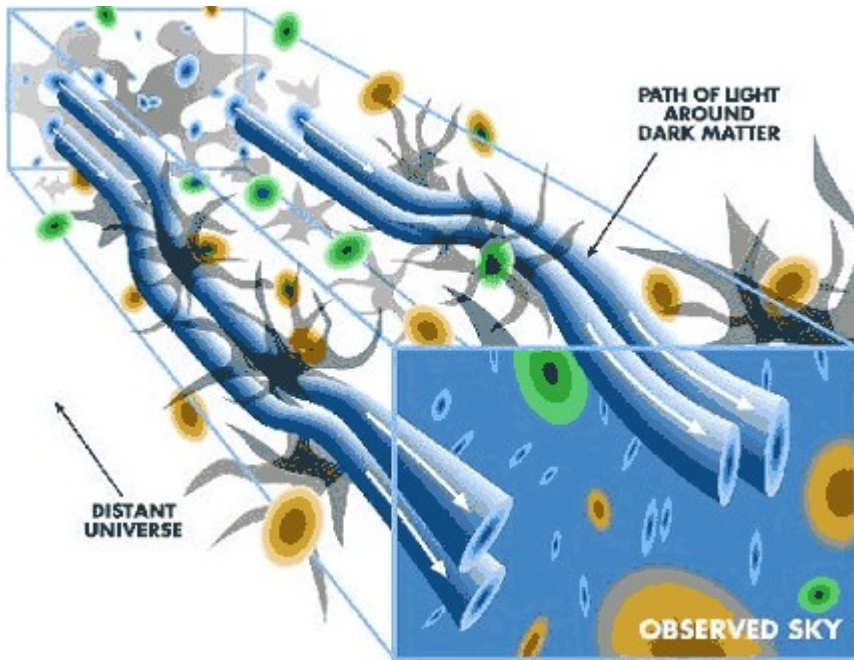
これまでの観測結果



$$w = -1.023 \pm 0.090 \text{ (systematic)} \\ \pm 0.054 \text{ (statistical)}$$

wを測る他の方法

▶ 宇宙論的重力レンズ効果



- 遠方の銀河の像が、宇宙の大規模構造を通過してくる間に重量レンズ効果でゆがむことを利用。
- ダークエネルギーのような「万有斥力」が働くと、ゆがみの統計的性質に大きく影響
- 異なる距離にある銀河の像のゆがみを測定することで、 w の時間依存性もわかる

将来の観測計画

SNAP (Supernova Acceleration Probe)

2mの反射鏡を搭載した宇宙望遠鏡 (HSTの600倍の視野)

Ia型超新星探査＋宇宙論的重力レンズ効果

LSST (Large Synoptic Survey Telescope)

チリのアンデス山脈に口径8m、視野10平方度の望遠鏡

宇宙論的重力レンズ効果

Hyper Suprime-Cam

すばる望遠鏡の主焦点に搭載する視野3.14平方度のカメラ

宇宙論的重力レンズ効果

WF MOS (Wide-Field Multi-Fibre Optical Spectrograph)

4000個程度の銀河のスペクトルを一度に観測して、赤方偏移を決定する分光器

バリオン音響振動

何がわかった / わかるのか？

w と dw/dt の値が分かったとしても、ダークエネルギーを説明したことにはならない

▶ 観測的に $w \neq -1$ だったとすると、

- 全く説明のつかないエネルギー
- 宇宙の地平線を越えるスケールでの重力理論の修正？

▶ 仮に $w = -1$ かつ $\frac{dw}{dt} = 0$ と観測的にわかったとして

- ダークエネルギーが宇宙定数と矛盾しないとわかるだけ。
- 「素粒子物理のあるモデルで説明できる」というだけの議論では意味が無い
- 素粒子物理の理論的必然性から自然にダークエネルギーの存在が値も含めて示されて初めて意味がある。

smallness 問題

宇宙定数の1つのモデル：実スカラー場の真空のエネルギー

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial \phi_\mu \partial \phi_\nu - V(\phi)$$

$$\begin{aligned} \rho_\phi &= \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \\ p_\phi &= \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi) \end{aligned} \longrightarrow w \simeq -1 \quad (\dot{\phi}^2 \ll |V(\phi)|)$$

真空のエネルギーの自然な大きさ

$$\Lambda \simeq \frac{m_{pl}^5}{l_{pl}^3 \hbar G^2} = 5.16 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3$$

我々の宇宙のダークエネルギーの大きさ

$$\Lambda = 0.66 \times 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

120桁以上の食い違い

まとめ

- ▶ 我々の宇宙のエネルギーの70%程度は、ダークエネルギーと呼ばれる未知のエネルギーで占められている
- ▶ Ia型超新星の観測から、宇宙膨張は加速していることから、ダークエネルギーの存在が示唆される
- ▶ ダークエネルギーの性質は、宇宙膨張の速さを調べることによって状態方程式に制限をつけられる
- ▶ 銀河などの観測で検出できるバリオン音響振動の振動スケールを目印にして、宇宙膨張の速さを測ることが可能
- ▶ 現在までの観測結果は、宇宙定数($w=-1$)と矛盾しない
- ▶ ダークエネルギーの真の理解には程遠い